

오종민*, 박재영
경희대학교 환경학과

1. 서론

최초의 지구상 오염은 비점오염원(非点汚染源)에 의해 시작되었으며, 산업화와 도시화에 따른 인구집중 현상으로 인해 점오염원에 대한 문제가 대두되었다. 따라서 최근까지는 대부분의 국가에서 점오염원 처리에 주안점을 두고 정책을 추진하였으나, 20세기 중반 이후 토지이용의 고도화에 따른 비점오염원의 증가로 인하여 점오염원 처리만으로는 수질 목표 달성에 어려움이 있다는 사실을 인식하게 되었다.

도시지역 인구집중 현상은 폭발적인 교통량의 증가를 초래하였고, 이로 인해 지표면(地表面)은 토양 고유의 완충능력이 상실된 불투수층(不透水層)이 증가하여 강우시 일시에 고농도 오염물질이 수계로 유입, 수생 생태계에 악영향을 미치고 있다. 환경기초 시설의 증가로 어느 정도 점오염원은 처리되고 있으나, 그로 인하여 수계에 미치는 오염물질량 중 비점오염물질이 차지하는 비율은 더욱 증가되고 있다.

본 연구는 대부분의 지표면이 불투수지역으로 이루어진 도시지역 도로와 지붕 그리고 하수구에서 강우시 발생하는 오염물질의 유출 형태를 파악하고, 오염부하량을 산정하여 비점오염물질에 대한 효율적인 관리 방안을 마련하는데 기초 자료로 활용하고자 본 연구를 수행하였다.

2. 조사지점 및 실험방법

본 연구의 조사지점은 인구가 약 4 만명에 이르는 소도시지역인 경기도 용인시 기흥읍 신갈리로서, 이 지역에는 농업용수로 사용되는 기흥저수지(일명 : 신갈호-인공호수)로 유입되는 신갈천(일명:오산천 상류)이라는 길이 10.7 km의 소하천이 동서로 흐르고 있다. 이 신갈천으로 강우시 도로 노면이나, 지붕, 주차장 등 신갈지역 불투수 지표에 쌓여 있던 퇴적물이 무분별하게 유입되어 신갈천의 수질을 악화시키고, 기흥저수지의 저니층에 퇴적물이 쌓여 수생 생태계를 악화시키고 있다.

조사지역의 토지이용형태 중 가장 큰 면적을 차지하는 도로, 지붕 그리고 이들에 의해 씻겨진 오염물질이 유입되는 하수구(3 지점)를 선정, 총 5개 지점에서 강우초기에는 10~20분으로 시간 간격을 짧게 하고, 시간이 경과할수록 간격을 1~2시간으로 길게 하여 시료를 채취하였고, 시료 채취일 마다 직접 강우를 조사하였다. 본 조사는 1997년 5월 12일부터 1998년 6월 2일까지 총 5회에 걸쳐 시간에 따라 유출수를 채취하였다.

실험실로 운반된 시료는 수질공정시험법과 Standard Method에 준하여 유기물질(SS, BOD, COD_{cr}, T-N, T-P)을 분석하였고, 시료를 질산-황산 분해로 전처리를 행한 후 여과(GF/C)하여 AAS(Atomic Absorption Spectrophotometer)로 무기원소(Ba, Zn, Al, Cr, Cd, Pb)를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 유기물질의 유출 형태

10.8시간 동안 강우량이 66 mm였던 97년 5월 12일에 유출수량 및 유기물질의 농도 변화를 도로, 지붕 그리고 하수구에서 살펴보았다.

(1) 도로

다른 토지이용형태보다 오염물질의 농도가 높았던 도로에서는 평균 유량이 0.146 L/sec로 조사되었고, 강우개시 5.2시간 후에 가장 높은 0.353 L/sec을 보였다. 유량 변화는 강우강도(rainfall intensity) 즉 시간당 내린 강우량(mm/hour)에 따라 달라지는데, 대체로 강우량이 많았던 시간과 거의 일치하였다.

부유물질(이하 SS)의 평균 농도는 680 mg/l을 보였고, 강우개시 0.7시간후에 1,958 mg/l로 가장 높은 농도를 보여 강우초기에 고농도의 SS가 유출되는 초기세척(first flush)현상이 일어났다. 이와 같은 초기세척 현상은 도로가 아스팔트와 콘크리트로 구성된 불투수성 지역이기 때문으로 생각된다.

호소의 부영양화에 영향을 미치는 것으로 알려진 질소(T-N)와 인(T-P)의 평균 농도는 각각 4.37 mg/l, 1.33 mg/l로 나타났는데, T-N은 강우초기에 가장 높은 14.01 mg/l였고, 유량이 많았던 4.2시간 후에 가장 낮은 농도인 1.40 mg/l을 보였다. T-P 또한 T-N과 비슷한 경향을 보이며, 강우초기에 2.90 mg/l로 가장 높았다.

(2) 지붕

지붕에서 SS와 COD 평균 농도는 각각 31 mg/l, 60 mg/l로 조사되어, 도로에 비해 각각 1/22, 1/6.8에 해당되는 것으로 나타났다. 이것은 퇴적 고형물에 침착된 유기물이 주로 사람의 활동과 차량에 의해 발생하는 것으로 사료된다.

T-N, T-P의 평균 농도는 각각 2.50 mg/l, 0.15 mg/l로 도로보다는 매우 낮았는데, 초기에 각각 5.19 mg/l, 0.55 mg/l로 가장 높아 지붕에서도 도로와 마찬가지로 초기세척이 일어나는 것으로 나타났다.

(3) 하수구

하수구에서 시간에 따른 유출변화에서 SS와 COD의 평균 농도는 각각 182 mg/l, 155 mg/l로 지붕보다는 높고 도로보다는 SS와 COD가 각각 4.5, 2.6배 가량 낮게 나타났다. 이는 가정하수나 지붕, 나무 등 비교적 퇴적물의 양과 오염물의 농도가 낮은 지역을 통해 들어오는 저농도의 유출수가 하수구로 유입되어 도로 등에서 들어오는 고농도의 오염물질을 희석시키는 역할을 하는 것으로 사료된다.

T-N과 T-P의 평균 농도는 각각 7.46 mg/l, 1.31 mg/l이고, 이때 직접 강우의 의한 T-N, T-P의 농도가 각각 1.20 mg/l, 0.10 mg/l로 나타났다. 비강우시 일일 평균 가정하수의 T-N, T-P 농도가 각각 18.02 mg/l, 1.37 mg/l로 조사되어, T-N, T-P의 농도에서는 점오염원인 가정하수가 차지하는 비율이 높은 것으로 사료된다.

3.2 무기원소의 유출 형태

(1) 도로

강우가 2시간 내린 8월 21일에 도로에서 무기원소의 시간에 따른 농도 변화에서, 석탄의 연소나 토양성분에서 기인하는 것으로 알려진 Ba과 연료, 자동차 타이어 마모, 윤활유 등에서 기인하는 Zn의 평균 농도는 각각 73.83 $\mu\text{g/l}$, 153.87 $\mu\text{g/l}$ 로 조사되었다. Ba과 Zn은 대체로 전 강우시간 동안 비슷한 농도로 유출되었으며, 강우강도가 3 mm/hour였던 강우 개시 1시간 후에 농도가 증가되는 것으로 나타났다.

주로 도로 포장물질이나 자동차의 브레이크 라이닝에서 유래되는 것으로 알려진 Cr은 평균 농도가 지붕보다 29배 높은 45.77 $\mu\text{g/l}$ 을 보였고, 주로 유연 휘발유와 페인트에서 기인하는 Pb의 농도는 초기 강우 때 4.60 $\mu\text{g/l}$ 로 지붕보다 높게 나타났지만, 평균 농도에 서는 3.40 $\mu\text{g/l}$ 로 지붕 평균 농도 4.21 $\mu\text{g/l}$ 보다 낮았다. 이는 지붕에 칠해진 페인트에 함유된 Pb이 강우에 의해 용탈 되어지는 것으로 사료된다.

(2) 지붕

지붕에서 유출된 Ba과 Zn의 평균 농도는 각각 148.23 $\mu\text{g/l}$, 75.43 $\mu\text{g/l}$ 로 나타났으며 특히, Ba은 도로보다 2배정도 높게 검출되어 Ba의 주요염원이 차량과 사람의 활동보다는 대기 강하분진에 대한 영향이 큰 것으로 사료된다. Ba은 강우강도가 높았던 강우개시 1시간 후부터 농도가 219.75 $\mu\text{g/l}$ 로 증가되었는데, 이는 도로에서 Ba의 유출 특성과 유사하다. Zn은 강우초기 농도가 114.00 $\mu\text{g/l}$ 로 높았다가 천천히 감소하는 것으로 나타났다.

Pb는 강우개시 0.7시간 후에 7.00 $\mu\text{g/l}$ 로 가장 높았는데, 이는 강우량이 증가하여 유출되는 Pb의 농도가 높아진 것으로 생각된다.

(3) 하수구

강우량이 7mm이며, 2.5시간 강우가 내린 10월 13일 하수구에서 발생하는 무기원소의 시간에 따른 유출 농도 변화에서 무기원소 대부분이 강우초기의 농도와 비슷하게 유출되어 뚜렷한 변화를 보이지 않았다. 이는 강우가 내린 시간이 비교적 짧았고, 본 조사지역이 합류식 하수관거이므로 도로와 지붕에서 유출수가 계속적으로 조사지점인 하수구로 유입되는 지체현상(滯滯現象 ; retardation)에 의한 영향 때문에 초기세척 현상을 보이지 않은 것으로 사료된다.

Ba과 Zn의 평균 농도는 각각 197.1 $\mu\text{g/l}$, 224.7 $\mu\text{g/l}$ 로 8월 21일 도로와 지붕에서 유출된 Ba, Zn보다 높은 농도를 보였는데, 이는 강우강도가 높았기 때문에 하수구에서 유출된 농도가 높은 것으로 생각된다.

3.4 토지이용형태에 따른 오염부하량

(1) 유기물질의 오염부하량

강우시 유출되는 비점오염원의 오염부하량은 토지이용형태에 따라 다르고, 강우량, 선행무강우일수, 건설공사의 유무 등에 따라 차이가 있기 때문에 부하량을 산정하기란 매우 힘들다. Table 1은 본 연구 조사기간 동안 총 5회에 걸쳐 조사한 도로, 지붕, 하수,

강우의 부하량을 나타내었다.

도로에서 SS부하량은 평균 3,713 mg/hour-m², BOD, COD, T-N, T-P의 평균 부하량은 각각 68, 981, 20, 6.9 mg/hour-m²으로 조사되었다. 5월 12일 강우시 도로 노면을 통해 유출된 SS부하량은 1,609 mg/hour-m²으로 지붕에 비해 28배정도 높게 나타났는데, 이는 비강우시 도로 노면에 쌓여 있는 퇴적물을 육안 관측시에도 지붕보다 매우 많았다. SS를 제외한 BOD, COD, T-N, T-P에서 98년 6월 2일에 각각 89, 1,505, 33, 8.9 mg/hour-m²로 가장 높은 부하량을 나타냈는데, 평균 강우강도가 7.1 mm/hour로 가장 높았기 때문으로 사료된다.

지붕에서는 도로보다 집수면적이 작기 때문에 유출이 도로보다 빨리 종료되는데, SS와 COD 평균 부하량은 각각 40, 81 mg/hour-m²으로 조사되었다.

하수구에서는 총강우량이 66 mm였던 5월 12일의 오염부하량이 강우량 8 mm였던 10월 13일보다 약 2~3배 가량 높은 것으로 조사되었다. 그러나 COD부하량의 경우에는 10월 13일에 유출된 부하량이 더 많았는데, 이는 강우시 폐수의 다량 방류가 있었던 것으로 보인다.

강우에서는 5월 12일 COD부하가 지붕에서 발생된 부하보다 높게 조사되었는데, 이는 강우에 포함된 유기물질이 지붕 표면에 일부 퇴적된 것으로 보이며, 10월 17일 강우의 T-N부하는 도로보다도 높는데, 이 또한 같은 이유로 사료된다.

Table 1. The individual loading rates of organic matter for land use in raining.

(Unit : mg/hour-m²)

Land use \ Item		Rainfall Time (hour)	SS	BOD	COD	T-N	T-P
Load	97. 5. 12	10.8	1,609	60	749	16	6.9
	97. 8. 21	2.0	2,486	-	425	12	6.2
	97. 10. 17	2.17	5,741	54	1,245	18	5.6
	98. 6. 2	2.93	5,016	89	1,505	33	8.9
Roof	97. 5. 12	7.8	58	8	101	5	0.3
	97. 8. 21	2.0	22	-	62	5	1.2
Sewer	97. 5. 12	10.8	1,559	259	385	43	8.8
	97. 10. 13	2.5	757	64	756	39	2.0
Rain-fall	97. 5. 12	10.8	17	19	136	9	0.6
	97. 8. 21	2.0	-	-	12	5	0.6
	97. 10. 13	2.5	56	-	153	5	0.5
	97. 10. 17	2.17	139	19	265	25	1.3
	98. 6. 2	2.93	-	23	103	4	0.3

: no data

(2) 무기원소의 오염부하량

Table 2에는 강우시 무기원소의 오염부하량을 나타내었는데, 도로에서 8월 21일에 발생된 Cr부하량은 0.269 mg/hour-m²로 지붕보다 약 70배 높은 양을 보였고, Pb부하량은 0.015 mg/hour-m²로 지붕보다 1.6배 높았다. 이는 도로 노면에 퇴적물이 많고, 또한 많은 무기원소의 상당한 양이 자동차에서 유래되는 것으로 사료된다. Ba은 도로보다 지붕에서 더 높게 나타나 주로 대기 강하물질에서 기인하는 것으로 보인다.

10월 13일 하수에서 유출된 Cd, Cr, Pb부하량은 각각 0.030, 0.058, 0.043 mg/hour-m²로 비슷하게 나타났으며, Al은 Zn보다 15배 높은 16.923 mg/hour-m²으로 조사되었다.

Table 2. The individual loading rates of inorganic element for land use in raining.

(Unit : mg/hour-m²)

Land use \ Item		Ba	Cd	Cr	Zn	Pb	Al
Load	97. 8. 21	0.338	0.011	0.269	0.734	0.015	133.3
	97. 10. 17	0.563	0.030	0.259	1.300	0.057	135.1
	98. 6. 2	0.556	0.015	0.694	2.793	0.360	128.8
Roof	97. 8. 21	0.378	0.0002	0.004	0.219	0.009	0
Sewer	97. 10. 13	0.874	0.030	0.058	1.115	0.043	16.9

4. 결론

1) 도시지역의 토지이용형태 중 강우시 발생하는 SS와 COD 농도는 도로에서 가장 높았으며, 강우량이 66 mm, 10.8시간의 강우가 내렸을 때, 평균 0.146 L/sec의 유량을 보였고, SS, COD, T-N, T-P의 평균 농도는 각각 680, 408, 4.37, 1.33 mg/l로 조사되었다. 지붕에서는 평균 SS, COD, T-N, T-P 농도가 각각 31, 60, 2.50, 0.15 mg/l로 도로보다는 상당히 낮았다.

2) 강우시 하수구에서 유출되는 SS와 COD의 평균농도는 각각 182 mg/l, 155 mg/l로 지붕보다는 높고, 도로보다는 SS와 COD가 각각 4.5, 2.6배 정도 낮게 나타났다. 비강우시 하수구에서는 SS, COD, T-N, T-P의 일일 평균농도가 각각 57.01, 168.02, 18.02, 1.37 mg/l로 조사되었는데, 강우시 하수구에서 유출수와 비교해 보면, SS와 COD의 농도는 강우시에 높고, T-N, T-P는 비강우시에 높은 농도를 보였다.

3) 강우시 도로에서 발생된 오염부하량 중 SS는 3,713 mg/hour-m², BOD와 COD는 각각 68, 981 mg/hour-m², T-N과 T-P는 각각 20, 6.9 mg/hour-m²로 조사되었다. 지붕에서 발생된 오염부하량은 SS와 COD는 각각 40, 81 mg/hour-m²을 보였고, T-N과 T-P는 5.0, 0.8 mg/hour-m²로 나타났다. 하수구에서는 SS, COD, T-N, T-P의 오염부하량이 각각 1,158, 571, 41, 8.8 mg/hour-m²으로 조사되었다.

4) 강우시 무기원소의 오염부하량은, 도로에서 8월 21일에 발생된 Cr부하량은 0.269 mg/hour-m²로 지붕보다 약 70배 높은 양을 보였고, Pb부하량은 0.015 mg/hour-m²로 지붕보다 1.6배 높았다. Ba은 도로보다 지붕에서 더 높게 나타났고, 10월 13일 하수에서 유출된 Cd, Cr, Pb부하량은 각각 0.030, 0.058, 0.043 mg/hour-m²로 비슷하게 나타났다.

참 고 문 헌

- 김동술, 1997, 수원지역 분지오염의 화학적 분석 및 발생원조사, 경희대학교, 157-176.
- 국립환경연구원, 1993, 비점오염원으로부터의 오염물질 유출특성 조사를 위한 방법론적연구, 1-59.
- 방기웅 등, 1997, 도시소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한 연구, 한국수질보전학회지, 제 13 권, 제 1 호, 79-99.
- 오종민 등, 1998, 오산천 상류(신갈천)의 오염원 저감을 위한 부하량 산정, 수처리기술, 제 6 권, 제 2 호, 31-43.
- 오종민, 1998, 강우시 중·소도시지역의 토지이용형태에 따른 비점오염원의 유출특성, 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 410-415.
- 이태정, 1997, 수원지역 입자상 오염물질중 화학원소의 농도 경향 및 오염원 기여도 추정에 관한 연구, 경희대학교 박사학위논문, 45-55
- 和田安彦, 1994, ノンポイント負荷の制御 ; 都市の雨水流出と負荷制御法, 技報堂出版, 119-132.
- Delleur, J. W., 1982, Urban stormwater hydrology, ed. by David F. Kibler, American Geophysical Union, 1-34.
- Hopke, P. K. 1985, Receptor Modeling in Environmental Chemistry, John Wiley & Sons, 131.
- James D. Sartor *et al.*, 1974, Water pollution aspects of street surface contaminants, Journal WPCF, Vol. 46, No. 3, 458-467.
- Novotny, V. and Chesters G., 1981, Handbook of nonpoint pollution; sources and management, Van Nostrand Reinhold CO. N. Y., 312-390.
- Jong-min Oh *et al.*, 1998, Characteristics of Non-Point Sources and Loading at Middle and Small Cities Centers in Korea, The Geochemical Society of Japan,
- Peter, A. Krenkel and Novotony, V. 1980, Water quality management, Academic Press, 196-262.
- Tripathi, A., 1993, Airborne lead pollution in the city of Varanasi, India, Atmospheric Environment, 28, 2317-2323.